

文章编号:0253-9985(2011)06-0807-08

# 阿尔伯达盆地北极之光项目区块油砂层沉积样式

殷鹏飞<sup>1</sup>, 柳广弟<sup>1</sup>, 刘成林<sup>1</sup>, 李浩涵<sup>1</sup>, 刘文平<sup>1</sup>, 刘迎歧<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学, 北京 102200; 2. 中国石化国际石油勘探开发有限公司, 北京 100083)

**摘要:**在大量钻井地质成果及岩心数据研究的基础上,对北极之光油砂项目区块 McMurray 组的层序及沉积环境进行了划分及对比。结合测井数据,分析了 McMurray 组沉积相及岩石组合特征。北极之光项目区块中,McMurray 组是最重要的油砂发育层,其包含连续的河流、三角洲平原和潮控的河口湾沉积。将 McMurray 组划分为3段:上部——滨岸及浅海沉积、中部——河口湾及潮间带沉积、下部——陆相河流沉积。确定并讨论了每个层序的地质属性、地质时代、层序地层格架和沉积样式。根据测井数据,将其一步划分为9个亚相,部分亚相又细分成若干微相。并对其沉积模式进行了总结,提出下段河道砂体及中段河口湾及潮汐通道沉积的砂体为 McMurray 组主要的油砂储集层。该认识不仅为北极之光项目的可行性提供了依据,而且可对我国在加拿大阿尔伯达盆地的油砂勘探开发工作有重要的参考作用和指导意义。

**关键词:**油砂;层序;沉积相;沉积样式;McMurray 组;阿尔伯达盆地

中图分类号:TE121.3 文献标识码:A

## Depositional patterns of oil sand layer in Northern Lights block, Alberta Basin, Canada

Yin Pengfei<sup>1</sup>, Liu Guangdi<sup>1</sup>, Liu Chenglin<sup>1</sup>, Li Haohan<sup>1</sup>, Liu Wenping<sup>1</sup> and Liu Yingqi<sup>2</sup>

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. SINOPEC International Petroleum Exploration and Production Corporation, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on a lot of well and core data, McMurray Formation sequences and sedimentary environments were identified and correlated in Northern Lights oil sand block. With integrated logging data, this study analyzed the sedimentary facies and rock assemblages of the McMurray Formation. In this block, the McMurray Formation, the most important oil sand layer, consists of continuous fluvial, delta plain and tidal estuary bay deposits. The McMurray Formation was divided into three members. The lower member is longshore and shallow water deposits, the middle member is estuary bay and intertidal zone deposits and the upper member is continental fluvial deposits. The geologic characteristics, geologic time, sequence framework and depositional patterns of each sequence were confirmed. These sedimentary facies were subdivided into 9 subfacies, some of which were further subdivided into microfacies according to the logging data. Their depositional patterns were also established. The channel sands in the lower member and the estuarine and tidal channel deposits in the middle member are the main oil reservoirs of the McMurray Formation. The study not only can provide the basis for the feasibility research of the Northern Lights Project, but also can guide exploration and development of oil sands in Alberta Basin.

**Key words:** oil sand, sequence, sedimentary facies, depositional pattern, McMurray Formation, Alberta Basin

### 1 地质背景

加拿大阿尔伯达盆地是落基山造山带东侧的

一个前陆盆地,面积  $170 \times 10^4 \text{ km}^{2[1]}$ 。盆地西部以落基山造山带为界,东部以前寒武北美地盾为界。北极之光油砂项目区块位于阿尔伯达省阿萨斯卡油砂分布区的东北角(图1),面积约为  $186 \text{ km}^{2[2]}$ 。

收稿日期:2011-08-10。

第一作者简介:殷鹏飞(1969—),男,博士研究生,油气资源调查与管理。

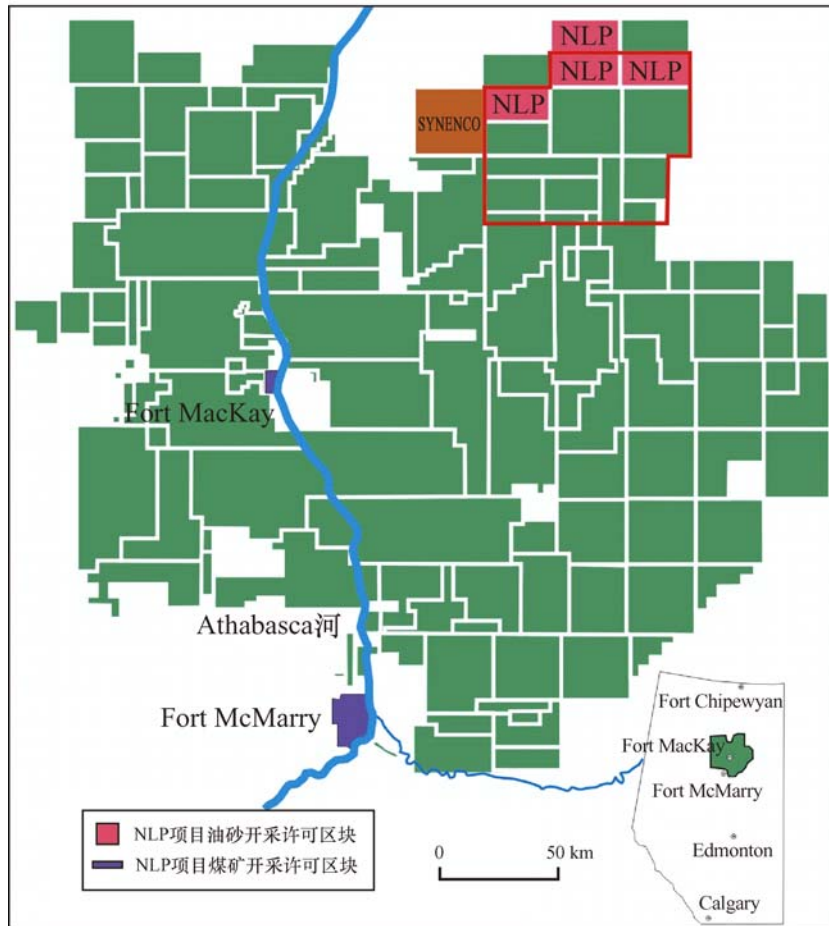


图 1 北极之光油砂项目油砂区块位置

Fig. 1 Location of Northern Lights oil sand block

对该区块的钻探始于 2000 年,到目前为止,各类钻井约为 1 600 口,取心约 1 200 多口<sup>[3]</sup>。2007 年当时的作业者 Synenco 能源公司对北极之光区块的资源量进行了评价,除此之外未对该区块地质进行系统研究。

阿尔伯达盆地沉积岩源自加拿大地盾和西部上升高地上形成的碎屑物质。盆地主要沉积了上泥盆统、下白垩统和第四系(图 2)。在北极之光项目区块的东面及东北面出露有前寒武纪地层,因此,推测前寒武纪地层在北极之光项目区块内埋深不是很大。泥盆系直接不整合于前寒武纪地层之上<sup>[4]</sup>。在阿萨巴斯卡油砂分布区可进行横向对比的泥盆系包括 Methy 组、Prairie Evaporate 组及 Waterways 组。下白垩统 McMurray 组在阿萨巴斯卡地区广泛沉积于泥盆系碳酸盐岩卡斯特地貌之上。在 McMurray 组上段沉积时,由于发生海平面下降,海水逐渐退出项目区块地区,结束在该区块的沉

积<sup>[5]</sup>。但海水并未全部退出阿萨巴斯卡地区,在其南部还沉积了海相 Clearwater 组碎屑岩地层。

区内油砂资源主要产于下白垩统 McMurray 组。由于受太平洋板块向东俯冲于北美板块之下所产生的近东西向的挤压作用,使得 McMurray 组地层从未深埋过<sup>[6]</sup>。早期沉积地层生成的大量石油由西向东、向上移动,穿过长达 100 km 的岩石层,直至达到接近地面的大面积砂岩层,石油等碳氢化合物被细菌大量蚕食,最终变成沥青,形成今天所开发的油砂资源<sup>[7]</sup>。所以,加强对区内下白垩统特别是 McMurray 组沉积环境、砂体展布的研究对油砂开发具有重要意义。

## 2 McMurray 组地层划分及沉积环境分析

McMurray 组包含连续的河流、三角洲平原和

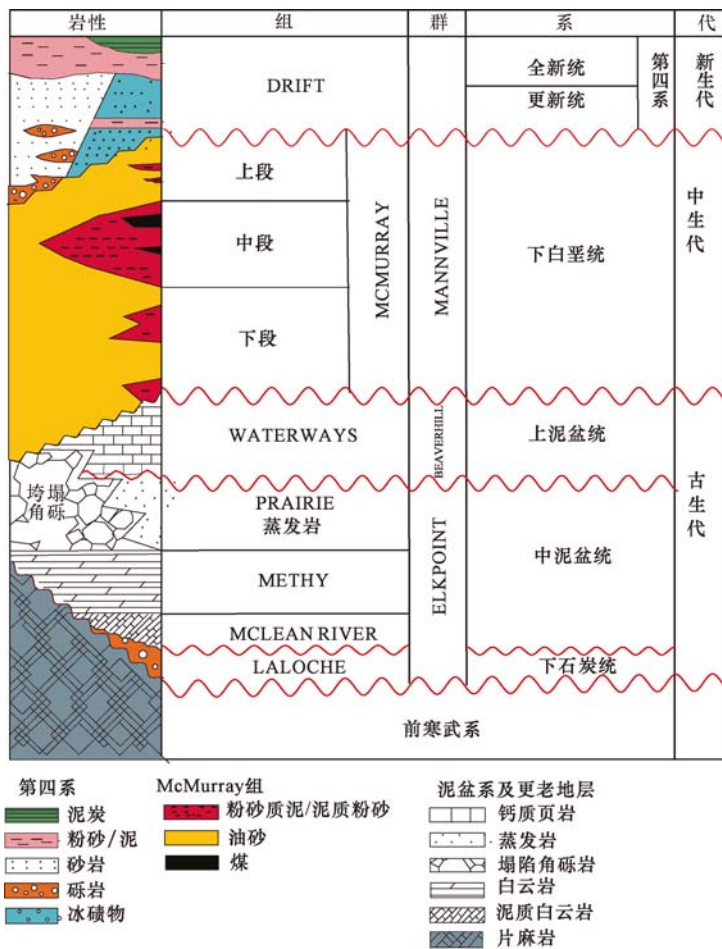


图 2 北极之光项目地层综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the Northern Lights block

潮控河口湾沉积。阿萨巴斯卡地区有很平缓的北倾古斜坡和较高的沉积补偿率<sup>[8]</sup>。在北部和上部,海相地层更加普遍。主要的河流体系沿北西北—南东南向的漏斗状分布于白垩系底部,由于北部抬升的 Boreal 海平面使其逐渐被淹没,形成了河口湾和微咸湾。隆起地区白垩系底部不整合面在 McMurray 组末期被覆盖,逐渐形成多期充填的河口相(图 3),而在河道间发育微咸湾、潮滩、潮道和垂向河道沉积<sup>[9]</sup>。

McMurray 地层成角度不整合覆盖在受侵蚀的泥盆系上,包括一系列的早白垩世厚层河流、三角洲及河口沉积。McMurray 地层的厚度从 0 (完全被剥蚀)到 100 多米不等<sup>[10]</sup>。

McMurray 组砂岩分选中等—好,部分地区有泥岩夹层,平均孔隙度为 35%,沥青平均含量为 80%,是油砂资源主要储集层位<sup>[11]</sup>。根据对岩心的观察与描述,McMurray 组可划分为上、中、下 3

段,其中上段仅能在少数井中观察到。

McMurray 组下段不整合于泥盆系碳酸盐岩之上,主要由一套砂、泥互层地层组成,厚度可达 50 m 以上。泥质以灰色至深灰色泥、粉沙质泥,灰黑色炭质泥,局部含植物根<sup>[12]</sup>。砂由细至极粗粒砂组成,但主要为中、粗砂,细砂含量相对较少,局部含细砾石,砂的分选中等到较好;砂中通常发育小型到大型高角度斜层理及交错层理;砂层厚度通常几米,局部超过 10 m。上段普遍含煤层,通常厚 1~2 m,局部煤层厚度达 4~5 m。其岩性及沉积构造特征显示该段为陆相河流环境下的产物<sup>[12]</sup>,向上过渡为中段沉积。

McMurray 组中段由浅灰至灰色泥、粉沙质泥、泥质粉砂、细至中粒砂组成。在砂、泥互层的层段,其界面通常为波状,生物扰动强烈,虫孔发育;砂、泥层厚从几毫米到数十厘米不等。砂层中通常发育小型交错层理,局部发育羽状交错层理;砂层中局

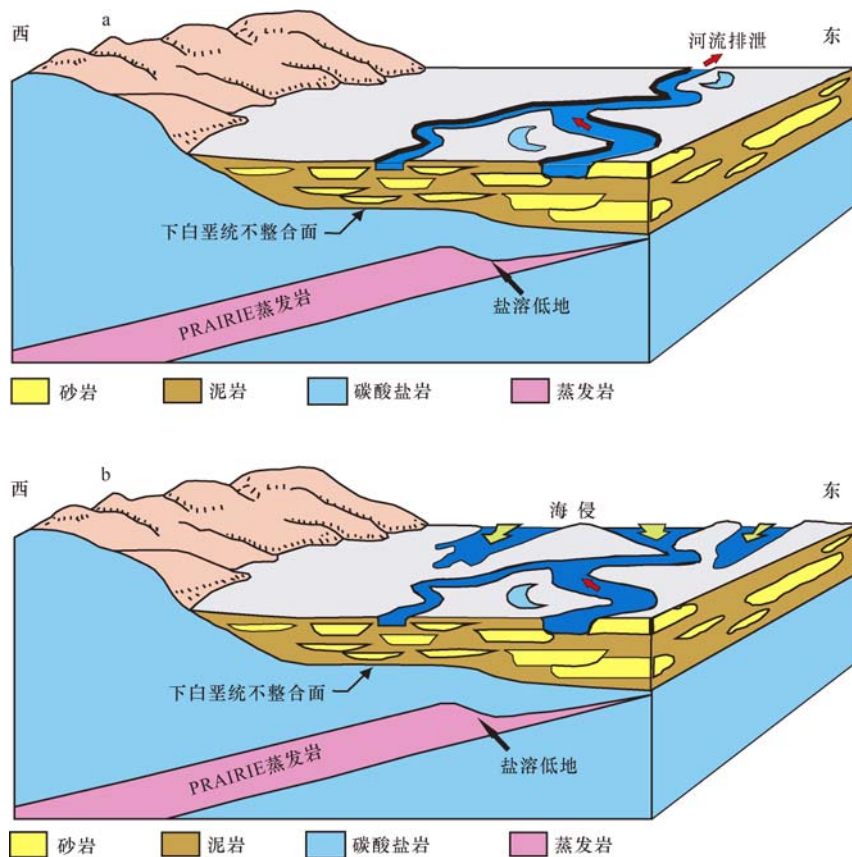


图3 阿萨巴斯卡油砂矿 McMurray 组沉积期岩相古地理图

Fig. 3 Lithofacies paleogeography in the McMurray period in Athabasca oil sands mine

a. 河流侵蚀初期; b. 海侵阶段河口湾相沉积

部含泥质角砾及炭屑<sup>[13]</sup>。该段为河口湾-潮汐通道-潮坪环境下的沉积物,向上过渡为上段沉积。

McMurray 组上段仅在几口井中钻遇,且厚度不大。在这些井中,上段主要由细至中粒砂夹少量中等波状薄层灰黑色泥层,砂层厚度几厘米到数十厘米;泥质层厚度在几厘米间变化<sup>[14]</sup>。在上段地层中发育少量虫孔,这些虫孔比中段发育的虫孔稍大。所见到的上段地层中泥质含量通常小于30%,推测为滨岸中上部沉积<sup>[15]</sup>。

### 3 沉积相、岩石组合及特征

在阿萨巴斯卡油砂区东北部,根据露天开采地区的岩心研究,确定主要有3种沉积相:McMurray 组下段为陆相河流沉积环境,中段为河口湾及潮间带沉积,上段为滨岸至浅海沉积<sup>[16]</sup>。

#### 3.1 陆相河流沉积

根据岩性组合,下段陆相河流相可进一步划

分为4个亚相类型。

##### 1) 河道亚相

岩性以厚层状黑色细至粗粒砂为主,夹极少量薄泥质层,发育小型至大型高角度斜层理及交错层理,分选中等至较好;通常由数个向上变细的旋回组成,底部常由极粗粒砂及细砾组成,反映极强的水动力条件。该亚相砂为下段主要的油砂储集层(图4)。

##### 2) 洪泛平原-沼泽亚相

沼泽亚相岩性以厚层至块状灰色泥质、灰黑色炭质泥及煤层以为主;而洪泛平原亚相则以泥质、粉砂为主,含细砂。该亚相反映沉积时气候温和,植被发育(图4)。

##### 3) 天然堤-决口扇亚相

该亚相发育浅灰至灰色泥、粉砂及细砂,局部发育中砂,具扰动构造。局部发育小型斜层理及交错层理。砂层有时含沥青,但不能构成油砂储集层。该亚相在区块范围内并不普遍发育。

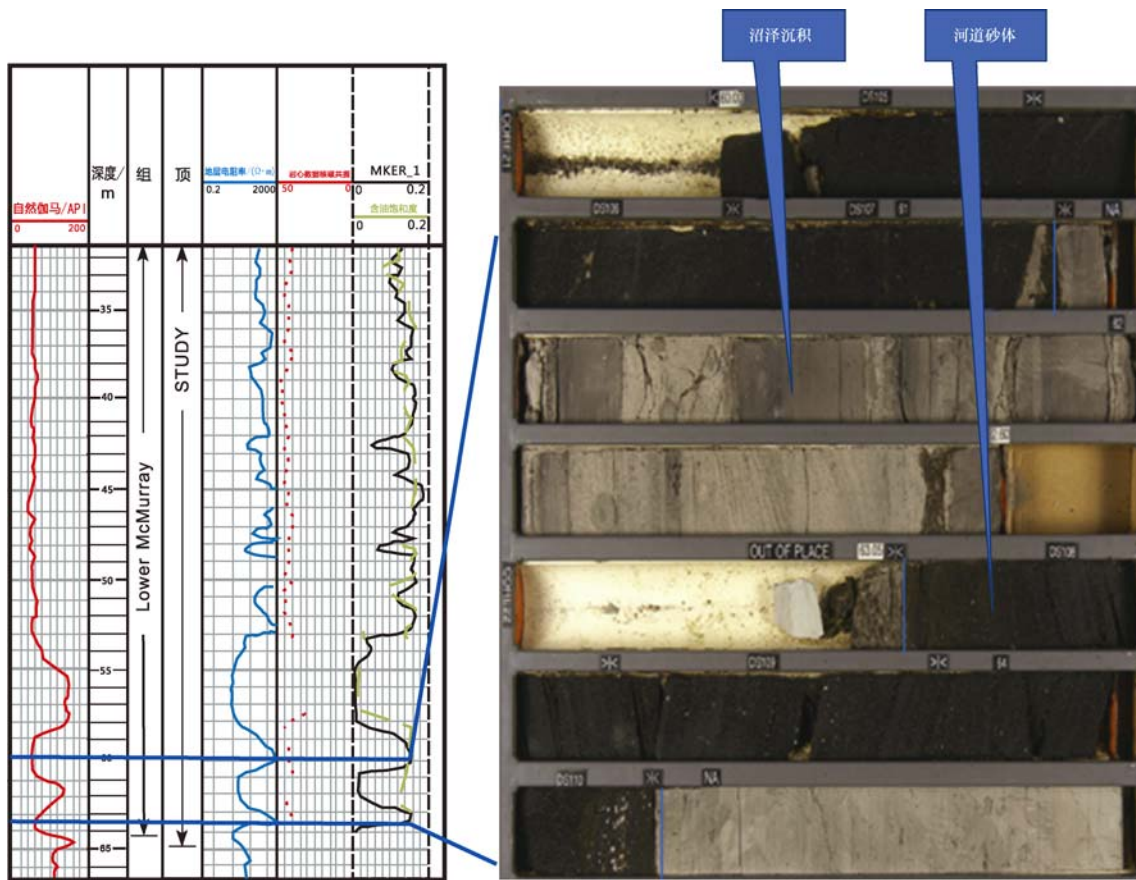


图4 河道及沼泽亚相沉积特征及测井曲线特征

Fig. 4 Sedimentary and logging characteristics of channel and swamp subfacies

4) 垮塌- 塌陷亚相

该亚相为阿尔伯达省阿萨斯卡油砂沉积区特有的沉积相。这是由于在早白垩世早期,该区泥盆系碳酸盐岩地层出露地表,遭受强烈风化剥蚀,地势起伏很大,在河流沉积过程中,碳酸盐岩垮塌,与河道砂混合在一起形成的油砂与碳酸盐岩角砾的混合物。塌陷湖为该区另一种沉积景观,这是由于碳酸盐岩地貌发生塌陷形成的小型湖泊,导致垮塌的碳酸盐岩角砾与早白垩世沉积物混合在一起。

3.2 河口湾及潮间带沉积

3.1.1 河口湾潮汐- 潮汐水道亚相

该亚相主要由细至中粒、分选很好的砂组成,局部含很薄的泥质层,泥质含量通常小于10%;发育低角度、小型斜层理及交错层理;局部含少量细砾及炭屑(图5)。局部地区由下段陆相河道沉积逐渐过渡为中段的河口湾沉积。

3.1.2 潮坪亚相

该亚相可进一步划分为以砂为主的砂质潮坪微相、砂泥混合的混合潮坪微相及以泥质为主的泥质潮坪微相。

1) 砂质潮坪微相

砂质潮坪微相主要由极细至细粒砂组成,含少量泥质,虫孔发育,有轻微至中等程度的生物扰动构造。发育小型波状及交错层理;泥质层常为波状,厚度在几毫米到几厘米之间。层面常因生物扰动而模糊不清(图6)。该微相砂为该区块次要含油层。

2) 混合潮坪微相

该微相通常由数毫米至数厘米级厚的泥、粉沙质泥及极细至细粒砂互层组成,泥层及砂层常为波状,并发育低角度小型交错层理;但虫孔极为发育,生物扰动强烈而导致层面难以辨认(图6)。

3) 泥质潮坪微相

该微相主要由灰-浅灰色厚层泥、粉沙质泥

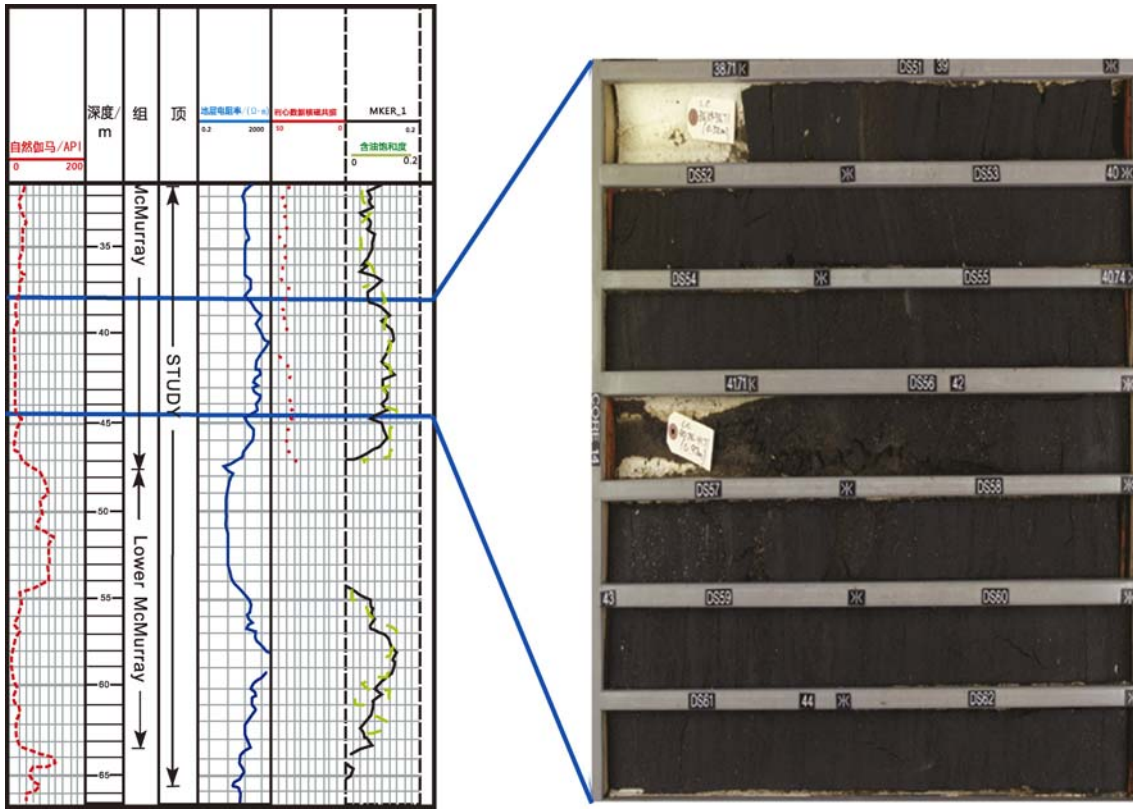


图 5 河口湾潮汐通道亚相沉积特征及测井曲线特征

Fig. 5 Sedimentary and logging characteristics of estuary tidal channel subfacies

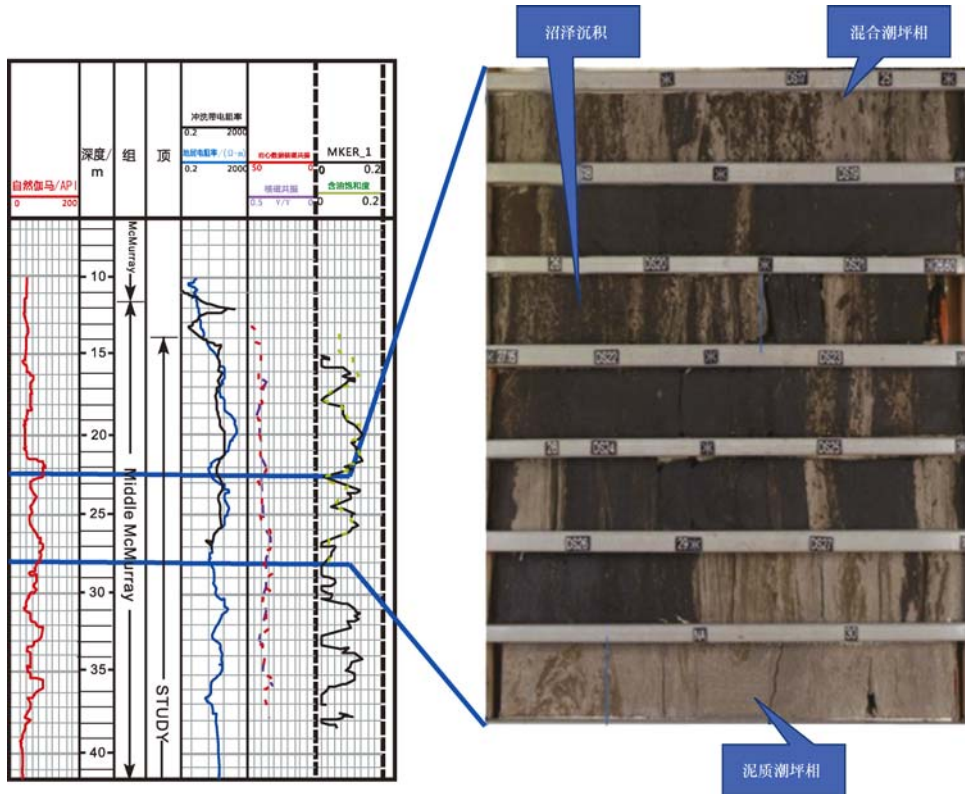


图 6 潮坪亚相沉积特征及测井曲线特征

Fig. 6 Sedimentary and logging characteristics of tidal flat subfacies

夹毫米级厚的极细至细粒砂层组成;砂层常为波状,发育少量虫孔,局部有轻微的生物扰动与磷铁矿结核(图6)。

### 3.3 滨岸及浅海沉积

#### 1) 近滨亚相

仅在少数几口井中见到上段沉积物,其岩性为细至中粒砂夹灰黑色薄层泥,砂层厚通常在几厘米至数十厘米,分选很好,并发育小型交错层理。泥质层通常为波状,含粉砂。发育少量虫孔,但较中段虫孔大。推测为近滨中上部沉积。

#### 2) 浅海亚相

在该区块未钻遇该亚相沉积物,但在阿萨巴斯卡南部,该亚相主要为灰黑色泥及粉砂质泥。

#### 3) 滨岸亚相

在该区块未钻遇该亚相沉积物,但在阿萨巴斯卡南部,该亚相主要为中、细粒分选极好的砂组成,并发育小型交错层理。

## 4 沉积模式

早白垩世早期,经过长期风化剥蚀,泥盆系在本研究区块及整个阿萨巴斯卡地区形成高低起伏的风化壳地貌特征<sup>[9]</sup>。在低洼及峡谷地区

形成众多沼泽,从而沉积了一套砂、泥、煤互层的碎屑沉积地层。在 McMurray 组下段沉积末期,由于北方海(Boreal Sea)入侵,海平面上升,在项目区块所处地区,接受了一套河口湾—潮汐通道—潮坪环境下沉积的砂、泥地层。McMurray 组中段沉积末期,发生进一步海侵,该区进入边缘海沉积时期,从而沉积了一套滨岸—滨面—浅海沉积物。图7为 McMurray 组下段沉积模式示意图。

## 5 结论

1) McMurray 组包含早白垩世的厚层河流、三角洲平原和潮控的河口湾沉积,呈角度不整合覆盖在受侵蚀的泥盆系上。McMurray 组砂岩分选好,孔隙度、渗透率高,油砂中沥青含量非常高,是区内油砂最发育层。

2) McMurray 组下段由一套不整合于泥盆系碳酸盐岩之上的砂、泥互层地层组成,为由泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩、炭质泥岩、细至粗砂岩组成的陆地河流相沉积;中段为泥岩、粉砂岩及细至中粒砂岩组成的河口湾、潮坪环境沉积;上段为滨岸至浅海环境下沉积的泥岩及细至中粒砂岩组成,仅在少数几口井中见到。

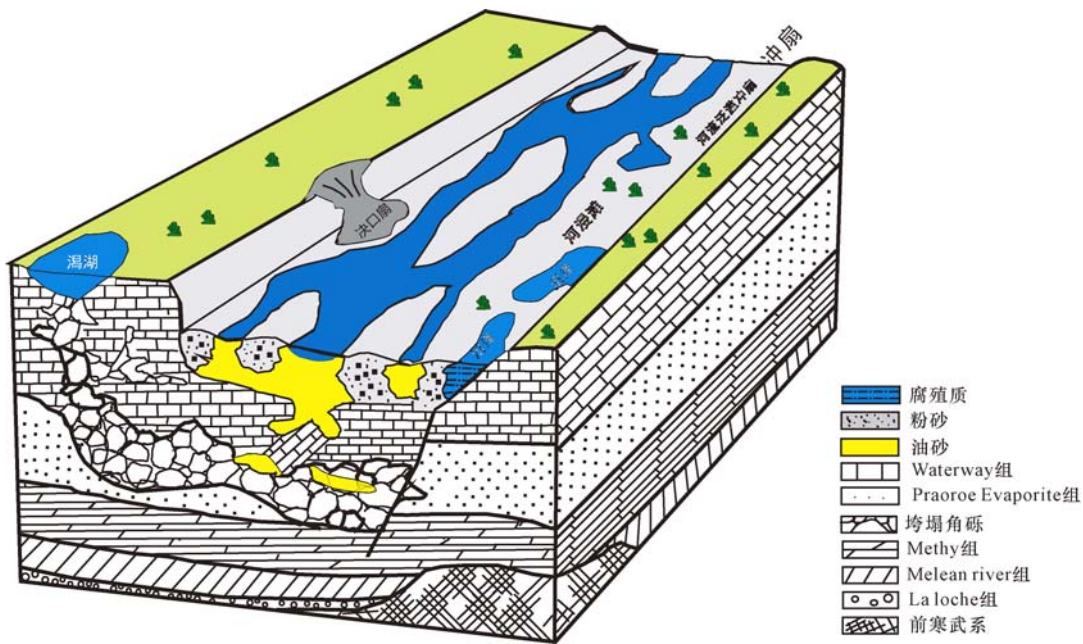


图7 McMurray 组下段陆地河流相沉积模式示意图

Fig. 7 Sketch map showing sedimentary models of the continental fluvial facies in the lower member of the McMurray Formation

3) McMurray 组下段为河道-沼泽相的低水位体系域沉积物;而中段及上段为海侵体系域沉积物。其中低水位体系域的河道砂体及海侵体系域的河口湾-潮汐通道砂体构成了项目区块内油砂的主要储层。

4) 根据对岩心的岩性及沉积相分析,北极之光项目区块 McMurray 组地层可划分为3段,共9个亚相。下段陆相河流相可进一步划分为河道亚相、洪泛平原-沼泽亚相、天然堤-决口扇亚相以及垮塌-塌陷亚相;中段河口及潮间带划分为河口湾潮汐-潮汐水道亚相、潮坪亚相。上段划分为近滨、浅海、滨岸亚相。

#### 参 考 文 献

- [1] 高杰,李文. 加拿大油砂资源开发现状及前景[J]. 中外能源,2006,11(4):9-14.  
Gao Jie, Li Wen. Status and prospect of oil sand resource development in Canada[J]. China foreign energy, 2006, 11(4): 9-14.
- [2] 赵群,王红岩,刘人和,等. 挤压盆地油砂富集条件及成矿模式[J]. 天然气工业,2008,28(4):121-127.  
Zhao Qun, Wang Hongyan, Liu Renhe, et al. Oil sands gathering conditions and accumulation modes in compressional basins[J]. Natural gas industry, 2008, 28(4):121-127.
- [3] 程裕淇,王鸿祯. 地球科学大辞典(基础科学卷)[M]. 北京:地质出版社,2006,1-1173.  
Cheng Yuqi, Wang Hongzhen. Earth science dictionary (Basic science volume)[M]. Beijing:Geology Press,2006,1-1173.
- [4] Flach Peter D, Mossop Grant D. Depositional environments of lower cretaceous McMurray Formation[J]. AAPG Bulletin, 1985,1(69):55-57.
- [5] Alberta's energy reserves 2008 and supply/demand outlook 2009-2018[R]. Calgary: Energy Resources Conservation Board, 2009.
- [6] Monger J W H, Price R A, Templeman-Kluit D J. Tectonics me-cretion and the origin of the two major metamorphic and plutonic belts in the Canadian Cordillera[J]. Geology, 1982, 10:70-75.
- [7] Leenheer M J. Mississippian Bakken and equivalent formations as source rocks in the Western Canadian Basin[J]. Organic Geochemistry, 1984, 6:522-532.
- [8] Ranger M J, Pemberton S G. Elements of stratigraphic framework for the McMurray Formation in South Athabasca Area[J]. Canadian Society of Petroleum Geologists, 1997, 18:263-291.
- [9] Canadian crude oil production and supply forecast 2005-2015[R]. Alberta: Canadian Association of Petroleum Producers, 2005:3-5.
- [10] Canada's oil sands and heavy oil[R]. Calgary: Petroleum Communication Foundation, 2000:10-11.
- [11] Fransisco J, Gu Tierrez, Enrique Vasquez, et al. Formation and crude oil characteristics of oil reservoirs in the Orinoco petroleum belt as related to the geology[C]//The oil sands of Canada-Venezuela, Alberta; CIM, 1977, 17:3-5.
- [12] Dan Barson, Stefan Bachl, Phil Esslinger. Flow systems in the Mannville Group in the east-central Athabasca area and implications for steam-assisted gravity drainage (SAGD) operations for in situ bitumen production[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2001, 49(3):376-392.
- [13] Anfort S J, Stefan Bachu, Bentley L R. Regional-scale hydrogeology of the upper devonian-lower cretaceous sedimentary succession, south-central Alberta basin[J], AAPG Bulletin, 2001, 85(4):637-660.
- [14] Demaison G J. Tar sands and supergiant oil fields[C]//The oil sands of Canada-Venezuela, Alberta; CIM, 1977, 17:9-16.
- [15] Dusseaul T M B. Comparing venezuelan and Canadian heavy oil and tar sands[J]. Petroleum Society, 2001(61):1-19.
- [16] Steve Larter, Huang Haiping, Jennifer Adams, et al. The controls on the composition of biodegraded oils in the deep subsurface: Part II-Geological controls on subsurface biodegradation fluxes and constraints on reservoir-fluid property prediction[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(6):921-938.

(编辑 董立)